

상향링크 URLLC를 위한 다중 분산안테나 시스템

홍준표*, 류종열^o

Distributed Antenna System for Uplink URLLC

Jun-Pyo Hong*, Jong Yeol Ryu^o

요약

본 논문에서는 상향링크 통신환경에서 저지연·고신뢰 목표성능 달성을 위한 다중 분산안테나 시스템을 제안한다. 통신지연에 대한 제약이 없는 기존의 통신 시스템과는 달리, 저지연 통신시스템은 짧은 코딩블록길이 때문에 전송률의 열화와 오류율이 증가하는 문제가 발생한다. 이와 같이 저지연 통신에 발생하는 성능 저하를 완화하기 위한 분산안테나 시스템 자원할당 문제를 수립하고, 시뮬레이션을 통해 제안한 다중안테나 시스템이 목표성능 달성에 필요한 주파수 자원을 기존 시스템에 비해 크게 줄일 수 있음을 확인한다.

Key Words : URLLC, Distributed antenna system, MMSE receiver, Uplink communications

ABSTRACT

This paper proposes a distributed antenna system (DAS) for achieving a target ultra reliable and low latency communication (URLLC) performance. Compared to the conventional communication systems without the latency constraint, the low-latency communication systems have degraded transmission rate and reliability due to its short coding blocklength. We develop a resource allocation framework for DASs to mitigate the performance

degradations and show that DAS can significantly reduce the required spectrum resources to achieve a target performance in most cases.

I. 서론

Industry 4.0의 흐름으로 제조업과 같은 전통 산업에 IT 시스템을 결합하여 생산 시설들을 네트워크화하고 지능형 생산 시스템을 갖춘 스마트 공장의 수요가 커지고 있다. 이에 5G 통신 시스템 표준화에서는 공장 자동화를 위한 mission-critical machine-type communication (MTC) 기술에 대한 논의가 활발하게 이루어지고 있다. 공장 자동화를 위한 mission-critical MTC는 기존 이동통신 시스템에 비해 상당히 낮은 지연과 높은 신뢰가 보장된 통신 (ultra reliable and low latency communication, URLLC) 기술이 요구된다. 예를 들어 공장에서의 기기제어와 알람을 위해 $1-10^{-9}$ 의 통신 신뢰도와 0.5~5ms 수준의 통신 지연을 만족시켜야 한다^[1].

이와 같은 높은 성능 요구치를 만족시키기 위해 짧은 블록길이 패킷^[2], 다중 안테나 다이버시티^[3], 기지국 고밀화^[4] 등 다양한 무선통신 기술에 대한 논의가 이루어져왔다. 최근 단일 기지국 환경에서 URLLC 성능 목표치 달성을 위한 자원 할당 문제를 effective bandwidth와 짧은 블록길이 패킷의 전송률 공식을 활용하여 정의하고, 이를 해결하기 위한 heuristic 알고리즘이 연구되었다^[5]. 이들 연구는 통신 지연과 신뢰도 요구치가 함께 고려된 문제를 처음 정의하였다는 점에서 의의가 있으나 직교 채널 할당을 통한 간단한 형태의 전송 기법에 대해서만 다루고 있다는 점에서 성능개선의 여지가 있다.

본 논문은 높은 통신 신뢰도와 낮은 통신 지연을 보장하기 위한 기술로 분산 다중안테나 시스템 (distributed antenna system, DAS)을 고려한다. DAS는 기존 기지국에 집중배치 되었던 다중안테나들을 분산된 지역에 배치함으로써, 기기들과의 짧은 통신 거리로 경로감쇄의 영향을 덜 받을 수 있을 뿐만 아니라 위치에 따른 기기 사이의 통신성능 차이도 줄어드는 효과를 얻을 수 있다.

* 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음

• First Author : (ORCID:0000-0001-7478-8513)Pukyong National University Department of Information and Communications Engineering, jp_hong@pknu.ac.kr, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4468-7102)Gyeongsang National University Department of Information and Communications Engineering, jonyeol_ryu@gnu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201901-411-A-LU, Received January 10, 2019; Revised March 3, 2019; Accepted March 12, 2019

II. 제안 시스템 및 성능

본 연구에서 고려하는 환경은 N 개의 분산 수신안테나, 전송할 패킷을 가진 K 개의 송신노드, 그리고 분산안테나와 광대역 유선 케이블로 연결되어 송신노드들의 패킷을 복원하는 central unit (CU)로 구성되어 있다. CU는 송신노드들로부터 수신한 파일럿(pilot) 신호로부터 채널 정보를 추정하여 알고 있음을 가정한다. 각 송신노드는 단일 안테나를 갖고 있음을 가정한다.

각 송신노드는 W 의 대역폭을 갖는 N_B 개의 부채널(sub-channel)로 동일한 패킷을 동시에 전송한다. 이때 모든 송신노드들의 패킷 전송은 CU로부터의 승인(grant)을 거친 부채널 할당과정을 필요로 하지 않기 때문에 부채널 할당을 위한 제어신호 교환과정 생략으로 LTE와 같은 기존 통신 기법과 비교해 프로토콜 차원에서 통신지연을 줄일 수 있다.

N 개의 분산 안테나가 부채널 b 로 수신한 신호는 다음과 같이 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_b = \sum_k \mathbf{h}_{b,k} x_k + \mathbf{z}_b \quad (1)$$

여기서 x_k 는 송신노드 k 가 전송한 패킷의 심볼, $\mathbf{z}_b \sim \text{CN}(0, N_0 \mathbf{I}_N)$ 는 부채널 b 에서의 수신 잡음, $\mathbf{h}_{b,k} \sim \text{CN}(0, \mathbf{D}_k)$ 는 송신노드 k 가 전송한 패킷이 부채널 b 에서 겪게 되는 채널이득, \mathbf{D}_k 는 대각 행렬로 이 행렬의 각 요소 $d_{k,n}$ 은 송신노드 k 의 패킷이 안테나 n 을 통해 겪게 되는 large-scale fading을 나타낸다. 직교채널을 할당하는 기존 시스템과는 달리 송신노드들이 모두 동일한 대역으로 패킷을 전송하기 때문에 수식 (1)에서 확인 할 수 있는 것과 같이 전송패킷들은 서로에게 간섭을 미친다.

CU는 분산 안테나들로부터 수집한 각 부채널의 수신 신호 (1)에 각 노드 k 에 대한 MMSE 필터를 적용하여 다음과 같은 스칼라 합성신호를 만든다.

$$\tilde{y}_{b,k} = \mathbf{w}_{b,k}^H \mathbf{y} = \mathbf{w}_{b,k}^H \mathbf{h}_{b,k} x_k + \tilde{z}_{b,k} \quad (2)$$

여기서 $\tilde{z} \sim \text{CN}(0, \mathbf{w}_{b,k}^H \mathbf{h}_{b,k})$,

$$\mathbf{w}_{b,k} = \left(N_0 \mathbf{I}_N + \frac{P}{N_B W} \sum_{i \neq k} \mathbf{h}_{b,i} \mathbf{h}_{b,i}^H \right)^{-1} \mathbf{h}_{b,k} \quad (3)$$

복원하려는 패킷의 signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) 최대화를 위해, N_B 개의 합성신호 (2)에 maximum ratio combining (MRC)를 적용한다. MRC 적용 후 SINR은 다음과 같다.

$$\Gamma_k = \frac{P}{N_B W} \sum_{b=1}^{N_B} \mathbf{w}_{b,k}^H \mathbf{h}_{b,k} \quad (4)$$

2.1 패킷복원 오류 확률

짧은 코딩 블록길이의 패킷전송에서 달성 가능한 최대 전송률은 다음과 같은 SINR에 대한 함수로 나타낼 수 있다²⁾.

$$s_k \approx \frac{T_f W}{\log 2} \left(\log(1 + \Gamma_k) - \sqrt{\frac{V_k}{T_f W}} Q^{-1}(\epsilon_c) \right) \quad (5)$$

여기서 $V_k = 1 - (1 + \Gamma_k)^{-2}$, $Q^{-1}(\cdot)$ 은 inverse Q함수, ϵ_c 는 짧은 코드 블록 길이로 인해 발생하는 오류 확률, T_f 는 패킷 전송 프레임의 길이를 나타낸다. 즉, 블록 길이가 $T_f W$, 오류확률이 ϵ_c 로 주어졌을 때, 보낼 수 있는 최대 정보 bit의 수가 s_k 로 표현되는 것이다. 예를 들어 수식 (5)에서 오류확률 $\epsilon_c = 0$ 일 때 $Q^{-1}(\epsilon_c)$ 가 무한대로 발산하여 $s_k \rightarrow -\infty$ 이 되므로, 짧은 코딩블록 길이의 패킷을 이용한 통신에서 오류 없는 통신은 불가능하다.

CU에서의 패킷 복원 실패에는 다음 두 가지 원인이 있다: ① 짧은 코딩블록 길이로 인한 오류 (확률: ϵ_c), ② 채널 상황이 좋지 않아 최대 전송률이 패킷의 크기보다 작아 발생하는 채널 outage (확률: $\Pr[s_k < u]$). 여기서 u 는 전송 패킷의 크기로 모든 송신노드가 동일한 크기의 패킷을 전송함을 가정한다. URLLC를 위한 통신 신뢰도 요구치가 $1 - \epsilon$ 으로 주어졌을 때, 위의 두 경우를 모두 고려한 전송실패 확률이 ϵ 이하가 되도록 해야 한다.

$$1 - (1 - \epsilon_c) \Pr[s_k \geq u] \approx \Pr[s_k \geq u] + \epsilon_c \leq \epsilon \quad (6)$$

위 식의 근사는 $\Pr[s_k < u]$ 와 ϵ_c 의 값이 충분히 작다는 가정에서 기인한다. 결국 URLLC 성능 요구치 만족을 위해 필요한 최소 자원은 다음과 같은 1차원 integer programming의 결과로 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} & \min \\ & 0 < \epsilon_c < \epsilon N_B \\ \text{s.t. } & \Pr[s_k < u] + \epsilon_c \leq \epsilon, \quad \forall k \\ & N_B \in \{1, 2, 3, \dots, N_{B,\max}\} \end{aligned} \quad (7)$$

III. 시뮬레이션

본 절에서는 가로 100m, 세로 100m의 정사각형 모양의 공장에서 높이 4m의 천장에 바둑판식으로 설치된 분산 다중안테나 환경에서의 시뮬레이션 결과를 살펴본다. 또한 80개의 송신노드들은 실내에서 독립적인 2차원 uniform 분포에 따라 위치한다.

제안 기법과의 성능 비교를 위해 모든 안테나들이 한 기지국에 모여 존재하는 co-located antenna system (CAS)의 성능도 함께 살펴본다. 시뮬레이션에서 고려되는 CAS는 안테나의 배치를 제외하면 제안한 DAS와 동일하게 동작한다. 그 밖의 시뮬레이션 환경은 다음과 같다: $P = 10\text{dBm}$, $W = 0.5\text{MHz}$, $N_{B,\max} = 200$ channels, $u = 100\text{bits}$, $N_0 = -174\text{dBm/Hz}$, $T_f = 0.1\text{ms}$, $\epsilon = 10^{-9}$, $d_{k,n} = \begin{cases} 42.7 + 16.4\log_{10}r_{k,n} [\text{dB}], & r_{k,n} \leq 14\text{m} \\ 10.8 + 45.4\log_{10}r_{k,n} [\text{dB}], & r_{k,n} > 14\text{m} \end{cases}$

그림 1은 URLLC 목표 성능 달성을 위해 필요한 최소 부채널의 수 N_B 와 이때 짧은 코딩블록 길이로 인한 블록 오류확률 ϵ_c 을 안테나 수의 변화에 따라 보여주고 있다. 그림 1에서 블록 오류확률 ϵ_c 는 N_B 를 최소화하기 위한 제어변수 값을 나타내는 것으로 시스템 성능과는 무관하다. 즉, 안테나 수 증가에 따라 필요 부채널의 수가 DAS와 CAS 모두 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 수신 패킷 복원을 위한 안테나 다이버시티 증가에 따른 SINR 분산 감소로 채널 outage 확률이 낮아지게 됨으로써 발생하는 현상이다. 자원효율 최대화를 위한 블록 오류확률 ϵ_c 또한 안테나 수 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있다. 한 가지 흥미로운 결과는, 제안하는 DAS는 안테나 숫자가 작은 경우에 CAS보다 좋은 성능을 보이지만 안테나 수가 증가함에 따라 CAS가 더 나은 성능을 보인다는 것이다. DAS의 경우, 한 송신노드 입장에서 안테나들

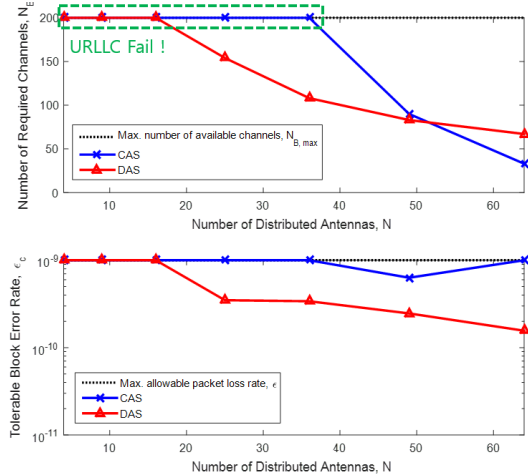


그림 1. 기존 기법과 주파수 효율 비교
Fig. 1. Spectral efficiency comparison with the conventional CAS

과의 경로감쇄 차이로 인해 수신 SINR이 인근 소수의 안테나에 의해 결정됨으로써, 짧은 통신키거리로 인한 전력이득은 얻을 수 있지만 안테나 다이버시티를 충분히 활용할 수 없어 발생하는 결과이다. 즉, 안테나 수가 작아 DAS와 CAS 모두 안테나 다이버시티를 충분히 활용할 수 없는 상황에서는 상대적으로 높은 전력이득을 얻을 수 있는 DAS가 나은 성능을 보이지만, 안테나 수가 많은 상황에서는 CAS가 안테나 다이버시티를 더욱 잘 활용할 수 있어 성능 역전이 발생한다. 따라서 인접한 안테나가 적어 안테나 다이버시티를 잘 활용할 수 없는 구석에 위치한 송신노드를 위해 외곽 지역에 분산안테나를 상대적으로 조밀하게 배치한다면 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 URLLC 목표성능 달성을 위한 분산 안테나시스템을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안 시스템이 대부분의 상황에서 기존 시스템보다 높은 자원효율을 달성함을 확인할 수 있었다. 또한 시뮬레이션 결과를 통해 안테나 배치 최적화에 대한 향후 연구의 실마리를 얻을 수 있었다.

References

[1] B. Holfeld, et al., "Wireless communication for factory automation: An opportunity for LTE and 5G systems," *IEEE Commun. Mag.*,

vol. 45, no. 6, pp. 35-43, Jun. 2016.

- [2] Y. Polyanskiy, et al., "Channel coding rate in the finite block length regime," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 5, pp. 2307-2359, May 2010.
- [3] L. Jing, et al., "Design and performance analysis of noncoherent detection systems with massive receiver arrays," *IEEE Trans. Sig. Process.*, vol. 64, no. 19, pp. 5000-5010, Oct. 2016.
- [4] J. Park, et al., "Revisiting frequency reuse towards supporting ultra-reliable ubiquitous-rate communication," in *Proc. WiOpt Workshops*, May 2017.
- [5] C. She, et al., "Cross-layer optimization for ultra-reliable and low-latency radio access networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 127-141, Jan. 2018.